

# Hydrodynamique, Erodabilité et Conservation des Sols Volcaniques Indurés d'Amérique Latine (Equateur, Mexique et Nicaragua): Impact du Matériau Originel et Effet de la Réhabilitation Agricole

Hydrodynamics, Erodibility and Conservation of Indurated Volcanic Soils in  
Latin America (Ecuador, Mexico and Nicaragua): Original Material Behaviour  
and Effect of the Agricultural Rehabilitation.

G. De Noni\*, J.L. Janeau\*\*, C. Prat\*\*, G. Trujillo\*\*\* et M. Viennot\*

\*Centre ORSTOM de Montpellier, B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex 1, France;

\*\*Mission ORSTOM au Mexique, Apdo. Postal 57297, C.P. 06501, D.F.

Mexique; \*\*\*Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage, Quito, Equateur.

## Abstract.

Studies on indurated volcanic soils, which cover large areas of Latin America, have been conducted by ORSTOM in association with local institutes such as : MAG (Ministerio de Agricultura y Ganaderia) in Ecuador, some universities among which CPM (Colegio de Postgraduados de Montecillo) in Mexico and DIRENA (Dirección de los Recursos Naturales y del Ambiente) in Nicaragua. Important lessons concerning the behaviour of these soils towards erosion by water and their suitability for an agricultural rehabilitation emerged from these studies, which have been carried out under simulated rainfalls (1 m<sup>2</sup>), on runoff plots (6 - 1000 m<sup>2</sup>) and on catchment basins of various areas (1 ha - 15 km<sup>2</sup>). When the natural material is concerned, the process of induration plays a major role: permeability and soil losses are low while runoff coefficients are higher than 70 %. When this indurated material is recovered for agricultural production, the management is difficult because of a nitrogen and phosphorus deficiency, and eventually significant soil loss (> 20 t/ha/yr), concerning especially the aggregates < 2 mm. The experiments carried out in Ecuador and Mexico proved that these two constraints could be overcome, leading to a successful agricultural rehabilitation.

## Introduction.

Parmi les andosols, il existe des sols particuliers qui se caractérisent par la présence d'horizons indurés. Ils occupent une grande extension en Amérique Latine, notamment en Equateur (Cangahua), au Mexique (Tepetate) et au Nicaragua (Talpetate). Ces sols n'affleurent qu'après le décapage par l'érosion hydrique des horizons plus meubles qui les coiffent. En l'état induré, ils sont impropres à l'agriculture; après ameublissement et sans régénération adaptée ce sont des sols à faible productivité. Les régions où ils se trouvent périclitent et se vident progressivement de leurs habitants: c'est le cas du bassin de Quito en Equateur (De Noni *et al.* 1983, 1986), du bassin-versant du lac de Managua au Nicaragua (Prat, 1991) et de la grande banlieue agricole de Mexico (Zebrowski, 1992).

Dans ces trois pays, on constate donc une relation étroite entre le développement des sols indurés, l'extension des paysages dégradés et la croissance de l'exode rural. L'objectif des programmes vise à répondre à cette problématique: d'une part en évaluant l'impact hydrodynamique des sols indurés avant et après ameublissement, d'autre part en étudiant des possibilités de réhabilitation de la fertilité du matériau ameubli en milieu paysan ou d'actions de reboisement sur bassins-versants. Les essais sont réalisés sur petites et grandes parcelles expérimentales (de 6 à 1000 m<sup>2</sup>) en Equateur et au Mexique, sur bassins-versants de différentes tailles (1 ha à 15 km<sup>2</sup>) au Nicaragua et ont donné lieu aussi à des campagnes de simulation de pluies en Equateur et au Nicaragua.



L'objet d  
concerne  
aménagement  
assurer u

I. OBJE

I.1. Les

1.1.1. L

En E  
andin où  
strato-v  
fine, and  
20 % de  
(climat  
position  
cangahu  
bruns et  
4400 m.  
des sols  
cangahu  
recouve

Au ?  
de l'océ  
(cendre  
caldeira  
varie de  
d'autres  
mois su

Au ?  
Nevada  
volcani  
1992).  
observe  
sols bri  
et glac  
indurés  
et ont  
calcaire  
une suc  
dépôt s  
tepetati

1.1.2. F

Ces  
leur du  
l'autre.

L'objet de cet exposé est de rendre compte des résultats majeurs issus de ces essais. Les uns concernent l'ensemble des facteurs hydrodynamiques causes de l'érosion, les autres se réfèrent aux aménagements anti-érosifs en milieu paysan et sur bassins-versants qui sont nécessaires pour assurer une réhabilitation et une gestion durables de ces sols.

## 1. OBJET D'ETUDE

### 1.1. Les horizons des sols volcaniques indurés.

#### 1.1.1. Localisation.

En Equateur, les cangahuas sont localisées dans les régions centre et nord du bassin intra-andin où s'est déposée la majeure partie des projections pyroclastiques émises par d'imposants strato-volcans tels le Chimborazo (6310 m) ou le Cotopaxi (5900 m). Il s'agit donc d'une cendre fine, andésitique ou dacitique, et indurée par la présence d'un encroûtement calcaire. Elles occupent 20 % des terres volcaniques du bassin (3000 km<sup>2</sup>, environ) et sont situées entre 2000 et 2800 m (climat subaride, 600 mm/an): soit, entre deux cañons sur les interfluves plats du bassin, soit en position de transition sur les piémonts de versants et glacis-terrasses (De Noni et al. 1986). Les cangahuas disparaissent en altitude lorsque le climat devient plus humide: on observe alors des sols bruns argileux à smectites et halloysites (2800-3200 m) puis sur les hautes terres, jusqu'à 4000-4400 m, les sols noirs à allophanes. Lorsqu'elles n'affleurent pas, les cangahuas sont coiffées par des sols bruns vertiques ou par des sols sableux, ponceux et pulvérulents. En profondeur, les cangahuas sont interstratifiées avec d'autres pyroclastites, notamment des ponces blanches et recouvertes localement par des paléosols (De Noni, Derruau, 1979).

Au Nicaragua, les "Talpetates" occupent une superficie de 2500 km<sup>2</sup> et sont localisés à l'ouest de l'océan Pacifique entre les lacs Managua et Nicaragua. Ce sont des tufs pyroclastiques altérés (cendres d'andésite basaltique "palagonitisées") provenant de l'explosion phréato-magmatique de la caldeira de Masaya, il y a 2000 ans environ (Prat, Quantin, 1992). Les talpetates, dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à plus d'un mètre, sont recouverts, avant décapage par l'érosion, par d'autres sols: sols bruns andiques dans les zones basses de piedmont (climat tropical sec avec 6 mois sans pluie) et andosols en altitude (900 m) où règne un climat tropical humide (3 mois secs).

Au Mexique, les "Tepetates" ont été étudiés sur les versants occidental et oriental de la Sierra Nevada qui sépare les bassins de Mexico (Texcoco) et de Tlaxcala. Les sols sont dérivés de dépôts volcaniques pyroclastiques, cendres rhyolitiques ou dacitiques très siliceuses et alcalines (Quantin, 1992). Ils sont distribués en climotoposéquences, entre 2200-2400 m et 4000 m d'altitude où l'on observe successivement d'amont en aval: andosols, sols bruns eutrophes, sols bruns vertiques et sols bruns subarides à croûte calcaire (Peña, Zebrowski, 1992 et Werner, 1992). Sur les piémonts et glacis, en climat à saison sèche marquée, les sols comportent deux ou plusieurs horizons indurés. Sur la partie supérieure et moyenne des piémonts, les tepetates sont friables à l'état humide et ont un comportement de "fragipan". Au bas des piémonts et sur les glacis, l'induration est calcaire et les sols demeurent durs (horizons pétrocalciques). Les tepetates sont interstratifiés dans une succession de dépôts volcano-sédimentaires. Ils sont recouverts actuellement en surface par un dépôt sablo-limoneux et en profondeur par 3 paléosols superposés. Dans la région de Texcoco, les tepetates occupent plus de 400 km<sup>2</sup>, soit près de 40 % de la surface totale.

#### 1.1.2. Propriétés physiques et chimiques majeures.

Ces sols se caractérisent par des contraintes physiques importantes dues à leur compacité et à leur dureté permanente. On distingue cependant des différences de comportement d'un pays à l'autre. Au Nicaragua, les talpetates présentent des horizons moyennement compacts (densité

apparente de l'ordre de 1 g/cm<sup>3</sup>) et une porosité totale pouvant atteindre 65 % du poids sec (Prat, Quantin, 1992). La texture argilo-limoneuse des horizons (porosité texturale de 10-15 %) et le nombre important de vides formés par l'empilement des microlithes (porosité structurale de 55-60 %) expliquent en grande partie ces valeurs élevées. La capacité de rétention en eau est donc importante mais en cas de précipitations abondantes, l'horizon se sature et sa dureté diminue permettant ainsi l'érosion par rigoles et ravines (Prat, 1989).

En Equateur et au Mexique, les sols indurés sont plus compacts (densités apparentes, respectivement de 1.7 g/cm<sup>3</sup> et de 1.45 g/cm<sup>3</sup>) et plus durs. La cangahua et le tepetate pétrocalcique, qui se caractérisent par des encroûtements calcaires et une teneur en argile inférieure à 15%, présentent une porosité totale (25-30%) et une capacité de rétention en eau (< 20-30%) faibles. En revanche, le tepetate-fragipan, moins calcaire et plus argileux, a une porosité totale supérieure à 40% (microporosité > 30%) et une réserve d'eau utile pour la plante d'au moins 10% en volume. La dureté augmente avec la présence de calcaire, elle est maximale à l'état sec (Miehlich, 1984); les valeurs de résistance à la pénétration sont élevées sur cangahua et tepetate pétrocalcique, de l'ordre 100 et 200 kg/cm<sup>2</sup> (Nimlos 1990; Peña, Zebrowski, 1992). Elles baissent à moins de 20 kg/cm<sup>2</sup> sur tepetate-fragipan. Il résulte de ces propriétés que la conductivité hydraulique est lente: de 5 à 15 mm/h au champ en Equateur, au Mexique, en laboratoire, de 2 à 10 mm/h sur tepetate calcaire et de 0,3 à 0,5 mm/h sur tepetate-fragipan.

La stabilité structurale des fragments grossiers est bonne (> 2 mm). Les expérimentations réalisées au Mexique, au champ et au laboratoire, montrent que l'agrégat optimum a un diamètre de 3.4 à 2.4 mm. Pour cette classe, 98% des agrégats sont stables, la vitesse d'infiltration est maximale et sans effet de colmatage, la capacité de rétention en eau (= 29% en poids et 39% en volume) est élevée et comparable à un sol argilo-limoneux. Les fragments fins (< 2 mm) sont par contre très instables. La rapidité de dispersion dépend cependant du taux de matière organique comme le montrent les observations réalisées au laboratoire en Equateur sur de petits échantillons de cangahua, disposés sur un tamis de 2 mm et sur lesquels on fait tomber des gouttes d'eau. Pour deux échantillons dont les taux de matière organique varient de 0.4% à 1.02%, il faut 2 fois plus de gouttes de pluie pour détruire les agrégats (Caujolle-Gazet et Luzuriaga, 1986).

Ces sols présentent aussi des propriétés chimiques particulières. La capacité d'échange cationique est en général élevée sur ces sols indurés: de 15 à 25 mé/100 g au Mexique et en Equateur, voir même supérieure sur les talpetates du Nicaragua, entre 20 et 40 mé/100 g. Les teneurs en base échangeables sont importantes comme le montrent les dosages, exprimés en mé/100 g, effectués en Equateur sur le calcium (9.5 à 14), le magnésium (4.5 à 11) et sur le potassium (0.8 à 1.9) ainsi qu'au Mexique sur les mêmes éléments, Ca (7 à 18), Mg (6 à 10) et K (0.8 à 1.2) (Custode, De Noni *et al.* 1992, Quantin, 1992). Sur tous les tepetates, les réserves minérales en potassium sont très importantes (2 à 3%) ainsi que leur disponibilité sous forme échangeable (0.6 à 0.8%). Le pH varie de neutre à légèrement basique pour ces sols. L'alcalinité augmente avec la teneur en calcaire (> 5%): on note des pH compris entre 8.5 et 9 sur cangahua et tepetate pétrocalcique.

En revanche, les sols indurés sont fortement carencés en matière organique, < 0.3%, en azote, < 0.04%, et en phosphore total et assimilable, < 3 ppm (Etchevers *et al.* 1991, a et b).

## 1.2. Les stations d'étude.

### 1.2.1. En Equateur.

L'ORSTOM et le Ministère équatorien de l'Agriculture et de l'Elevage (MAG) ont installé et suivi, de 1986 à 1992, un réseau d'une quarantaine de parcelles de ruissellement regroupées en 10 stations principales. Celles-ci sont situées dans les Andes et recourent, sur 800 km environ du nord au sud, différentes situations agricoles en conditions témoins et améliorées. Parmi ces situations, la station de Tumbaco correspond à une cangahua ameublie pour la culture du maïs. On se trouve ici dans le bassin de Quito (2650 m) au pied du versant est du volcan Ilalo. L'horizon

induré se trouve à 50-50 cm de profondeur, le sol meuble en surface provient en grande partie du défonçage de la congélation. On observe localement cependant quelques témoins résiduels du sol noir originel à smectite. La station est composée de 3 parcelles de ruissellement: une parcelle en culture traditionnelle (maïs) et une Wischmeier de 100 m<sup>2</sup> chacune (20 m x 5 m), et une parcelle améliorée de 1000 m<sup>2</sup> (50 x 20 m) dotée de bandes enherbées isohypses (De Neri *et al.*, 1990).

Par ailleurs, des simulations de pluies ont été réalisées à côté de la station sur cangahua induré et amaubié (Casteda, De Neri *et al.*, 1992).

### 1.2.2. Au Mexique

Le programme mexicain s'est déroulé dans le cadre d'un contrat CEE (TS2-A-212-C). Il a regroupé deux projets: l'un dans la région de Mexico (vallée de Texcoco) mené par le Colegio de Postgraduados de Montecillo (CPM) et l'ORSTOM; l'autre dans la région de Tlaxcala à la charge de l'Université de Glessen (UG) et un consortium de l'Université de Tlaxcala (UAT) et de Services du Gouvernement de cet Etat. L'étude expérimentale de l'érosion et de régénération de la fertilité a porté sur le tepetate de type fragipan qui présente les meilleures propriétés physiques et chimiques (Quantin, 1992).

Dans la région de Texcoco, les observations ont été effectuées sur une seule station située à San Miguel Tlaixpan (2550 m d'altitude) sur le piémont ouest de la Sierra du Tlaloc-Telapón. Le site est constitué par des parcelles de type Wischmeier, de 22 m de long par 2 m de large et sur une pente de 8 à 9 %. En 1990, les mesures ont été effectuées sur 6 parcelles de ruissellement (tepetate nu témoin et tepetates remaniés par rippage et pulvérisage). En 1991, le dispositif de la station a été revu et distribué en 7 parcelles: 5 sur tepetate et 2 sur sol non érodé, avec introduction sur chaque type de sol d'une culture de maïs. Hormis les mesures de l'érosion et du ruissellement (août-septembre 1991 et mai-octobre 1992), d'autres mesures ont été effectuées sur les propriétés physiques du tepetate (porosité, vitesse d'infiltration, humidité), sur l'évolution des états de surface et de la fonte des agrégats et sur l'évaluation du rendement du maïs. En 1992, un petit bassin versant de 1800 m<sup>2</sup> a été équipé, puis en 1993, ce sont 6 autres parcelles de tepetate rippé qui ont été aménagées en terrasses (Prat *et al.*, 1993; Marquez *et al.*, 1994).

L'autre site expérimental est dans la région de Tlaxcala. Il est formé par trois stations. El Carmen, Matlahuecan et Tlalpan. La situation est voisine de celle du site précédent: altitude de 2500-2600 m, pente de 8-9 % et régime climatique "ustic" avec 6 mois de saison sèche. De la même manière, le comportement d'un tepetate nu et fragmenté, avec ou sans culture de maïs, est comparé à celui d'un sol. Seules diffèrent les quantités de pluies et surtout les valeurs d'érosivité correspondantes. Les essais sur la productivité agricole des tepetates ont été réalisés sur les stations de El Carmen et Tlalpan (Marquez *et al.*, in Quantin, 1992).

### 1.2.3. Au Nicaragua

L'ORSTOM et la DIRENA (Direction des Ressources Naturelles et de l'Environnement) ont fait une étude intégrée du bassin-versant du lac de Managua dont l'un des objectifs est l'analyse des relations entre l'érosion hydrique et les systèmes de culture. Ce bassin-versant, d'une superficie de 850 km<sup>2</sup>, est délimité au sud par une Sierra volcanique et au nord par le lac Managua. En moins de 30 km, on passe de 60 m à plus de 900 m d'altitude, du climat tropical à saison sèche au climat tropical perhumide. Dans ce cadre, des observations ont été réalisées à l'échelle de plusieurs petits bassins-versants (1 ha à 15 km<sup>2</sup>) ainsi que localement sur des zones où l'érosion est significative. Parmi celles-ci, une attention particulière a été portée aux zones de piémont (glacis, bas et haut piémont) où les sols se caractérisent par la présence de talpetate. Les données disponibles se réfèrent au bassin-versant du Municipio "Los Altos de Santo Domingo", situé à 5 km au sud-est de Managua. Elles sont constituées par des mesures de ruissellement obtenues sous pluies simulées et d'humidité à la sonde à neutrons (Prat, 1989, 1991 et 1992).

## **2. METHODES D'ETUDE**

## 2.1. Régime et érosivité des pluies.

Cet aspect concerne l'Equateur et le Mexique où pour interpréter les résultats issus des parcelles de ruissellement, il est nécessaire de déterminer ce type d'information (De Nori *et al.*, 1990 et 1992, Quantin, 1992). Les hauteurs de pluies et les intensités correspondantes ont été mesurées avec des pluviographes. Sur les enregistrements pluviographiques, chaque pluie est découpée en segments de pente constante permettant ainsi de déterminer le début, la fin et la quantité d'eau en mm de la partie de pluie considérée. Ensuite, les données sont organisées par classes d'intensité et de fréquence d'occurrence.

Les observations effectuées en Equateur montrent que les appareils de rotation journalières ou mensuelles sont plus précis que ceux de rotation hebdomadaires car ils permettent d'identifier sur les enregistrements, outre les classiques intensités maximales (IM) en 30 minutes, des IM de 15 à 5 minutes. Dans plusieurs cas, les relations entre les intensités et les pertes en terre ont été meilleures avec les IM15.

Seules quelques pluies d'intensités remarquables sont responsables de plus de 60% de l'érosion totale. L'érosivité des pluies est donc un facteur déterminant. Elle est calculée conventionnellement selon la formule établie aux USA par le Service de Conservation des Sols (Wischmeier et Smith, 1978) où pour chaque événement on utilise le coefficient E.I<sub>30</sub>. E est l'énergie cinétique, I<sub>30</sub> l'intensité moyenne pendant 30 minutes, le résultat étant exprimé en système métrique international (MJ/ha x mm/heure).

## 2.2. Mesures du ruissellement et de l'érosion.

Quelle que soit la surface des sites expérimentaux, le ruissellement a été calculé à partir du volume mesuré dans les cuves de sédimentation situées au pied des parcelles de ruissellement (Equateur et Mexique, De Nori *et al.*, 1990, Quantin, 1992) et des enregistrements limnigraphiques sur les petits bassins-versants du Nicaragua (Prat, 1989). Les poids de terre sont évalués par pesées dans les cuves ou fosses de sédimentation et exprimés en poids sec (kilo. ou tonne) par hectare (ha) et pour une période déterminée. Pour de petites parcelles, de 6 à 44 m<sup>2</sup> au Mexique et de 100 m<sup>2</sup> en Equateur, ce type de mesure permet de relier un prélèvement à une pluie.

La méthode se complique lorsque les mesures sont effectuées sur des surfaces plus grandes, hormis sur bassins-versants où les hydrologues, qui possèdent une longue expérience en la matière, savent dimensionner correctement les fosses de sédimentation et les déversoirs correspondants. Sur les grandes parcelles de ruissellement, de 500 à 1000 m<sup>2</sup>, face au caractère aléatoire des événements on ne peut conseiller que de surdimensionner le dispositif de récupération des eaux et des terres. C'est ainsi qu'en Equateur, les plus grandes parcelles (1000 m<sup>2</sup>) ont été équipées d'une série de 4 cuves avec partiteurs représentant un volume total proche de 75 m<sup>3</sup>. Durant les 5 années d'observation, aucun débordement n'a été constaté. Les prélèvements ont été réalisés manuellement et après chaque pluie. Cette méthode est certes contraignante mais sûre. L'utilisation d'un système mécanique de prélèvement par échantillonnage telle la roue de "Coshocton" permet en principe d'alléger le protocole de mesures mais peut aussi causer des problèmes importants si son installation est imparfaite comme le montre l'exemple mexicain.

## 2.3. Mesures hydrodynamiques.

### 2.3.1. La simulation de pluie.

En Equateur et au Nicaragua, le simulateur utilisé est l'appareil mis au point à l'ORSTOM par Asseline et Valentin (1976). Il est composé d'une tour pyramidale de 4 m de haut au sommet de laquelle est fixé un système d'aspersion électronique doté d'un gicleur calibré. Ce dernier est animé d'un mouvement pendulaire dont l'énergie est fournie par une batterie et il est alimenté

régulièrement en eau, à pression constante (0.6 bars). Il est ainsi possible en faisant varier l'angle de balancement de créer au sol, sur une parcelle de 1 m<sup>2</sup> de surface, des averses dont l'intensité est proche de celle des pluies naturelles (de 15 à 150 mm/h).

En fonction des buts recherchés et des conditions climatiques locales, les protocoles suivants ont été utilisés: - en Equateur, les simulations ont duré 30 minutes pour des intensités de: 20 mm/h (plusieurs fois par an), 40 mm/h (fréquence bi-annuelle) et 60 mm/h (fréquence médiane). Entre chaque essai les temps de ressuyage sont de: 24 heures entre la première et la seconde pluie, 5 heures entre la seconde et la troisième pluie (Custode, De Noni *et al.*, 1992);

- au Nicaragua, les intensités testées sont de fréquence annuelle (de 40 à 60 mm/h durant 15 à 30 minutes, quinquennale (90 mm/h durant 20 minutes) et décennale (120 mm/h durant 15 minutes). Chaque parcelle a reçu 2 pluies simulées à 24 heures d'intervalle (Prat, 1989, 1992).

### 2.3.2. Régime hydrique.

L'étude du régime hydrique interne au sol concerne le Mexique (Quantin, 1992) et surtout le Nicaragua (Prat, 1989 1991; Prat *et al.* 1992) où les observations ont été particulièrement développées dans ce sens. Hormis les mesures classiques de densité réelle au CPM (moyenne de 2.3) et de densité apparente sur échantillons secs (humidité < pF 2.5), la porosité a été évaluée avec un porosimètre à mercure (Mod. Micromeritics 9310, pression d'injection du mercure de 28 à 28.000 Psi) selon la méthode de Cambier et de Prost (1981). Par ailleurs, l'évolution du front d'humectation a été suivie sur cinq profils (plus une répétition) distribués le long d'une toposéquence. Les mesures ont été effectuées avec une sonde à neutrons (Solo 25 de Nardeux) et selon les protocoles de Couchat (1974) et Poss (1991).

### 2.3.3. Evolution des états de surface.

La caractérisation de cette évolution a été réalisée au Mexique sur tepetate défoncé, billonné et cultivé en maïs (Jérôme, 1992). Elle consiste en l'observation des réorganisations structurales à la surface du sol selon la méthode préconisée par Casenave et Valentin (1989). Celle-ci permet une cartographie fine du développement des croûtes, une évaluation de la fonte des agrégats et une mesure de l'évolution du relief superficiel (billons-sillons) par les "points quadrats".

Par ailleurs, des expérimentations de laboratoire ont été réalisées sur 7 classes de taille d'agrégat obtenu après fragmentation contrôlée. Différents tests ont été appliqués sur ces agrégats: stabilité à une pluie simulée, capacité de rétention en eau, vitesse d'infiltration, porosité, fonte des agrégats par effet "splash" et par ruissellement (Quantin, 1992).

## **3. RESULTATS.**

### **3.1. Régime des pluies et érosivité.**

#### 3.1.1. Régime général.

Dans la Sierra équatorienne, le climat est équatorial à 2 saisons des pluies (septembre à novembre puis de mars à mai) séparées par une petite saison sèche qui correspond à l'hiver de Noël et une vraie saison sèche estivale qui s'étend de mi-juin à août. Les conditions générales sont comparables à celle de Mexico: gradient positif de pluie avec l'altitude et gradient négatif des températures mais les micro-climats sont particulièrement accusés. Les neiges éternelles sont atteintes au dessus de 4800 m d'altitude.

La cangahua s'observe entre 2200 et 2900 m (au-dessus elle perd son induration); ces conditions correspondent à une moyenne annuelle de pluies comprise entre 500 et 800 mm et une température

moyenne annuelle de 13 à 16 °C avec des variations mensuelles qui ne dépassent pas 1 °C autour de ces moyennes. Le régime hygrothermique est ustic-isomesic.

Le climat de la région de Mexico et de Tlaxcala est un climat intertropical différencié en raison de l'altitude (2200 à 5465 m) et d'effets de versants; les températures moyennes mensuelles varient peu : seulement 6°C au cours de l'année (Quantin, 1992).

De la vallée de Mexico au sommet de la Sierra Nevada, on distingue quatre zones climatiques caractérisées par une pluviosité croissante (totaux annuels et répartition) des températures de plus en plus froides et un régime hygrothermique passant de l'ustic-isomesic au cryic caractérisé par de fortes différences de températures diurnes. Il gèle et neige surtout en hivers.

Les tepetates sont présents seulement dans l'étage bas entre 2200 et 2800 m d'altitude; la température est comprise entre 15 et 11 °C; la pluviosité moyenne annuelle oscille entre 600 et 900 mm; la région appartient à la zone intertropicale nord définie par des pluies estivales de 6 mois (mai à novembre) dont 2 à 1 mois subhumides et 4 à 5 mois subarides (décembre à mars). Le régime hygrothermique est ustic-isomesic. Il s'agit donc d'un climat tempéré à pluies d'été et 6 mois de saison sèche hivernale à peine plus froide.

Au Nicaragua, la zone concernée par les talpetates s'étend depuis la côte ou le lac de Managua jusqu'à 1000 m d'altitude. Le climat est tropical sec (moins de 1000 mm) près de la côte puis tropical humide sur les reliefs (1600 mm).

En dessous de 500 m où les talpetates sont le mieux représentés, la température moyenne annuelle est élevée 27 à 29 °C avec de faibles variations des moyennes mensuelles. La saison des pluies est estivale, légèrement bimodale et dure 6 mois avec un maximum en mai et un autre en septembre; les autres 6 mois sont subarides. Le régime hygrothermique est ustic-hyperthermic (Prat *et al.* 1992).

### 3.1.2 Variabilité interannuelle des pluies.

On remarque qu'au Mexique l'irrégularité est inverse au nombre de jours de pluies.

En Equateur, dans les bassins intercordillères (Pourrut *et al.* à paraître) ont montré que pour des totaux annuels de pluies inférieurs à ceux de Mexico, la variabilité interannuelle est moyenne. Dans le tableau ci-après sont données la valeur moyenne de la pluie ainsi que les valeurs décennales et centennales calculées à partir des données existantes.

Irrégularité interannuelle

<b>Tulcán</b> $k3 = 1.76^*$	Moyenne annuelle = 865 mm
100 années sèches = 500 mm	100 années humides = 1 450 mm
10 années sèches = 646 mm	10 années humides = 1 140 mm
<b>Ibarra</b> $k3 = 1.77$	Moyenne annuelle = 616 mm
100 années sèches = 380 mm	100 années humides = 1 050 mm
10 années sèches = 465 mm	10 années humides = 825 mm
<b>Quito-observat.</b> $k3 = 1.59$	Moyenne annuelle = 1 204 mm
100 années sèches = 570 mm	100 années humides = 1 780 mm
10 années sèches = 947 mm	10 années humides = 1 504 mm
<b>Ambato</b> $k3 = 1.91^*$	Moyenne annuelle = 475 mm
100 années sèches = 260 mm	100 années humides = 800 mm
10 années sèches = 341 mm	10 années humides = 650 mm
<b>Loja</b> $k3 = 1.55$	Moyenne annuelle = 815 mm
100 années sèches = 530 mm	100 années humides = 1 170 mm
10 années sèches = 645 mm	10 années humides = 1 000 mm

\* Coefficient d'irrégularité interannuelle ( $k3$  = quotient des valeurs décennales humides et sèches).

Ce sont des valeurs moyennes à comparer avec  $K3 > 2.5$  sur la côte et  $K3 < 1.3$  en Amazonie où ce coefficient est particulièrement faible.

De cette étude on peut également faire ressortir que la variabilité est d'autant plus forte que les périodes sèches sont marquées et que les totaux pluviométriques moyens sont faibles. Cette observation est tout à fait conforme à la situation observée au Mexique: le quotient P annuel et nombre d'événements pluviaux est un bon indicateur de la variabilité.

Au Nicaragua, la position régionale des zones à talpetate et l'existence d'une saison sèche font conclure à une forte variabilité interannuelle dans les parties basses.

### 3.1.3. Variabilité stationnelle.

La variabilité des précipitations est importante d'un site à l'autre comme le montre l'exemple mexicain (Quantin, 1992). Cependant, quelle que soit l'ampleur de cette variabilité, d'un site à l'autre ou entre les trois pays considérés, on peut noter une relative similitude de comportement vis à vis de l'érosion: l'érosion est toujours le fait de quelques pluies.

En Equateur, sur 5 années d'observation, on a mis en évidence que dans ce pays où les intensités sont faibles à moyennes, quelques événements majeurs ( $IM_{15}$  pouvant atteindre 80 mm/h et  $IM_{30}$  de 40 à 55 mm/h) sont responsables de plus de 85 % de l'érosion (De Noni, Nouvelot *et al.*, 1984, De Noni, Viennot *et al.*, 1990 et 1992).

Il en est de même au Mexique. On observe, en effet, que 1 à 2 pluies moyennement érosives à El Carmen, 2 pluies fortement érosives et 3 pluies moyennement érosives à Tlalpan enfin, 1 pluie fortement érosive et 3 pluies moyennement érosives à Matlalohcan causent à elles seules 60 à 80% de l'érosion totale. Les pluies fortement érosives sont celles où  $I_{30} > 50$  mm/h. Dans le tableau ci après sont récapitulées ces observations:

Station	Pluie		E. 130	Alm
	H mm	N jours	U. Am	Lal
El Carmen	779	120	234	261
Matlalohcan	775	96	429	418
Tlalpan	803	112	357	330

Au Nicaragua, les données disponibles sont ponctuelles pour l'instant et estimées sur bassins-versants. On constate, également, que l'action de l'érosion régressive en ravines est en relation avec des pluies exceptionnelles, par leur intensité et leur durée. Ainsi au niveau de la zone basse (glacis de piémont), la pluie du 16 mai 1985, d'une hauteur de 216 mm en 90 minutes a provoqué la formation d'une ravine de 100 m de long, de 20 m de large et de 3 m de profondeur, soit 6000 tonnes de terres arrachées. Sur des bassins cultivés, des pluies plus normales, de l'ordre de 100 mm, provoquent des taux d'érosion de 35 t/ha (Prat, 1989).

## 3.2. Mesures du ruissellement et de l'érosion.

### 3.2.1. Sols indurés non ameublés.

Les mesures effectuées au Mexique, dans la province de Mexico, à San Miguel Tlaixpan sur tepetate nu, font ressortir la très forte valeur du coefficient de ruissellement 83 à 92% pour les 4 principales pluies soit une moyenne de 88.5% et des pertes en terre de 5 t/ha pour chacune des 2 années d'observation sur parcelles Wischmeier contre 12 t/ha sur un petit bassin versant de 1800 m<sup>2</sup> (Prat *et al.*, 1993; Marquez *et al.* 1994).

A Tlaxcala les 3 sites montrent des ruissellements importants (65 à 70%) et des valeurs d'érosion faibles (6 à 10 t/ha) sauf à Tlalpan où elles atteignent 30 t/ha.



En Equateur grâce à la simulation de pluie on a pu mesurer le ruissellement et évaluer la charge solide des sédiments. On a ainsi obtenu des coefficients de ruissellement de 80% pour une intensité de 20 mm/h et de 91% pour une intensité de 60 mm/h. Ces valeurs se stabilisent rapidement et dans tous les cas en moins de 10 minutes. Dans ces conditions la charge solide du ruissellement est nulle, ce qui est conforme aux observations.

En conclusion, c'est toujours sur sol nu induré, quelle que soit l'intensité de la pluie, que l'on observe les plus forts ruissellement: selon la dureté de l'induration et l'état de décapage de cette surface l'érosion est variable. Si la perte en terre est limitée, les ruissellements engendrent en aval une érosion régressive qui peut conduire à des catastrophes, les pertes en terre se chiffrant alors en centaines de tonnes.

Sols indurés, nus		année	CR %	E t/ha
San Miguel Tlaxoan	Texcoco- Mex.	90-91	89	5.1
El Carmen	Tlaxcala- Mex.	90-91	68	6.9
Matlolohecan		90-91	69	9.3
Tlalpan		90-91	67	30
Tumbaco	Quito- Equat.	Simulat.	85	<1

simulat. = par simulation de pluie

### 3.2.2. Sols indurés ameublés.

#### 3.2.2.1. Sols non cultivés.

Ils correspondent aux trois essais suivants:

- **sols rippés ameublés en gros éléments:** cette opération correspond à un rippage avec un engin lourd à chenilles de type "D8" qui laisse en surface une forte proportion de gros éléments (de 0.5 à 5 cm) de forme anguleuse.

Sous solés, nus		année	CR %	E t/ha
San Miguel Tlaxpan	Texcoco- Mex.	90-91	-	2
Matlolohecan	Tlaxcala- Mex.	90-91	32	33
Tumbaco	Quito- Equat.	Simulat.	0	0

Simulat. = par simulation de pluie

A San Miguel Tlaxpan, dans le bassin de Texcoco, le ruissellement n'est pas connu mais il est logique de considérer qu'il est faible et comparable aux résultats obtenus à Tumbaco. Dans cette station la simulation de pluie a montré que le sol superficiel couvert de gros "éléments structuraux" ne commençait à ruisseler qu'après 45 minutes sous une pluie de 100 mm/h. Cet événement a une probabilité très faible ; en effet il dépasse largement la pluie décennale qui est seulement de 55 mm/h pour cette même durée de 45 minutes! A Matlolohecan, le ruissellement comme l'érosion sont élevés en relation avec des pluies très érosives.

Un important taux d'éléments structuraux grossiers superficiel réduit l'effet cinétique des pluies la formation de la croûte de batance est retardée : le ruissellement et l'érosion restent faibles

- **sols rippés puis labourés (ameublés et émiettés):** ces traitements correspondent à un rippage suivi d'un ou plusieurs pulvérisages poussés qui éliminent presque tous les gros éléments afin d'obtenir un bon lit de semences.

Dans des conditions que l'on pourrait considérer comme favorables aux cultures, on observe des coefficients de ruissellement très élevés 23 à 70% selon les stations et des érosions pouvant dépasser 100 t/ha ce qui constitue des valeurs excessives.

Sous solé, labourés, nus		année	CR	E
			%	t/ha
San Miguel Tlalapan	Texcoco-Mex.	80-91	15	53.22
El Carmer.	Tlaxcala-Mex.	90-91	31	77
Maitlohcán		90-91	60	9.3
Tlalcan		90-91	63	128
Tumbaco	Quito-Ecuador	86-91	23	92

A la station de Tumbaco sur une parcelle de type Wischmeier qui en l'état d'état de surface, le coefficient de ruissellement annuel est relativement modéré mais l'érosion est importante puisqu'elle oscille entre 70 et 120 t/ha/an selon les années. Les plus fortes valeurs d'érosion ont toujours été obtenues dans ces conditions. Les pertes en suspension ne dépassent pas 30% du total érodé. Les coefficients de ruissellement annuels et mensuels restent en deçà mais ils peuvent sous quelques pluies atteindre 90% et donner lieu à des érosions exceptionnelles. Les mois les plus pluvieux : octobre, novembre et de mai qui ont des coefficients de ruissellement ne dépassant pas 35% donnent lieu à des érosions importantes. Au mois d'août, les rares précipitations accompagnées de chutes de grêle très localisées donnent lieu à des coefficients de ruissellement particulièrement forts. Sur le tableau ci-après on notera l'absence de corrélation entre la pluie, le coefficient de ruissellement et l'érosion.

#### Cangahua nue travaillée superficiellement

Tumbaco						
année	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	moyenne
P mm	686	707	627	467	716	659
CR annuel %	10.2	20.3	33.7	29.8	21.0	23.4
Erosion t/ha	69.8	102.2	77.2	94.3	117.3	92.1

P = Pluie annuelle

CR = coefficient de ruissellement annuel

Lorsqu'il y a diminution de la taille des éléments structuraux ceux-ci deviennent plus fragiles: il y a formation d'une croûte de battance qui favorise le ruissellement. Les grosses pluies donnent lieu à des phénomènes d'érosion intense.

- **sols rippés, pulvérisés et billonnés**: le billonnage conjugué à un rippage donne les effets catastrophiques du pulvérisage: à San Miguel Tlalapan, le ruissellement reste assez élevé (CR de 12%), mais l'érosion qui est de l'ordre de 1 t/ha est très faible; cependant l'expérience montre que cette stabilité a des limites. Au delà de 50 mm/h pendant 30 mn les billons ne résistent plus à la pression dans le billon. A Tumbaco, la première pluie (52 mm) de la saison 86-87 a donné lieu à une érosion de 19 t/ha sur un sol fraîchement pulvérisé où les billons se sont rompus en cascade.

Sous solé, labourés et billonnés, nus		année	CR	E
			%	t/ha
San Miguel Tlalapan	Texcoco-Mex.	90-91	12	1

#### 3.2.2.2. Sols indurés ameublés et cultivés.

Deux types d'essais ont été considérés:

- **sols rippés, labourés, billonnés et avec maïs**: cette modalité a été étudiée dans le bassin de Texcoco à San Miguel Tlalapan, dans la province de Tlaxcala et à Tumbaco en Equateur.

Les ruissellements sont faibles à modérés, l'érosion est moyenne mais peut prendre des valeurs relativement élevées lorsque sous l'action de fortes pluies les billons se rompent; ce phénomène s'amplifie quand le temps de culture augmente.

Sous solés, labourés, billonnés, maïs		année	CR %	E t/ha
San Miguel Tilapán	Texcoco- Mex.	90-91	5	1.2
El Carmen	Tlaxcala- Mex.	90-91	11	16
Tilapán		90-91	15	2.6-26
Tumbaco	Quito- Equat.	86-91	8.5	19

- sols rippés, labourés, billonnés avec mesures conservatoires et maïs: grâce aux parcelles de Tumbaco, on peut se faire une idée de l'efficacité du billonnage complété par des ouvrages conservatoires: ici des bandes enherbées isohyètes espacées de 10-15 m. D'autres essais ont montré que sur une même pente de 20%, les terrasses progressives les murets constitués de blocs de cangahua ont un rôle comparable.

Sous solés, labourés, billonnés avec mesures conservatoires, maïs		année	CR %	E t/ha
Tumbaco	Quito- Equat.	86-91	3.8	0.7

Dans ces conditions le ruissellement et l'érosion sont minimaux: respectivement 1.5 à 9% selon les années et moins de 1 t/ha de suspension.

### 3.3. Les mesures hydrodynamiques

#### 3.3.1. Simulations de pluies.

En Equateur, les essais ont été effectués sur cangahua naturelle à nu et sur cangahua défoncée à la pioche (Custode, De Noni *et al.*, 1992). Les agrégats sont grossiers (> 2 mm) et irréguliers. Cette situation annule la reprise du matériau pour la culture telle qu'elle se pratique traditionnellement. Sur cangahua nue, les coefficients de ruissellement sont forts comme sur le tepetate mexicain: de 80% pour une intensité de 20 mm/h et de 91% pour une intensité de 60 mm/h. Ces valeurs s'obtiennent rapidement et dans tous les cas en moins de 10 minutes. En revanche, la charge solide du ruissellement est nulle ce qui diffère des observations effectuées sur parcelles de tepetate. Il semblerait donc que les cangahuas équatoriennes des bassins intra-andins soient plus résistantes à l'érosion. Sur cangahua défoncée, le ruissellement et l'érosion sont nuls pour tous les essais. Pour le moins la première année, avant qu'intervienne la fonte des agrégats, la cangahua est relativement stable.

Au Nicaragua, les simulations de pluies ont permis de mettre en valeur l'action du travail et du degré de couverture du sol contre l'érosion. Comme en Equateur, c'est sur le sol superficiel à talpetate, compacté et nu, que le ruissellement est le plus fort: pour une intensité de 65-70 mm/h durant 90 minutes et une pluie utile de 100 mm, la lame ruisselée est supérieure à 30 mm sur sol sec et à 40 mm sur sol saturé. L'introduction d'une couverture sur le sol permet de réduire considérablement ces valeurs. Ainsi des morceaux ou des blocs de talpetate, de la même façon qu'une bonne couverture végétale ou de débris organiques, contribuent à protéger efficacement le sol contre l'érosion. Les éléments grossiers de talpetate, outre leur texture argileuse qui retient l'eau, absorbent l'énergie des gouttes de pluie et freinent le ruissellement par la rugosité qu'ils créent en surface. Par exemple, pour un sol couvert à plus de 80% par de la végétation, des débris de maïs ou des morceaux de talpetate, la lame ruisselée est inférieure à 5 mm. En revanche, un sol profond, labouré fraîchement et nu est très érodible. Son comportement est proche du sol superficiel nu: la lame ruisselée est de l'ordre de 20 mm sur sol sec et dépasse également 40 mm sur sol saturé (Prat, 1989, Prat *et al.* 1992).

### 3.3.2. Régimes hydriques.

La porosité globale du tepetate est supérieure à 40%; elle augmente à près de 60% par suite du labour. On constate cependant qu'elle se réduit progressivement au cours de la saison des pluies pour redescendre à 50% par effet de la fonte des agrégats et du tassement. De la même façon, la vitesse d'infiltration, qui s'est élevée de 1 mm/h à 100 mm/h sur les billons et à 50 mm/h dans les sillons, a régressé à 10 mm/h sur les billons et à 2 mm/h seulement dans les sillons (Quantin, 1992).

Le régime d'humidité d'un tepetate cultivé est comparable à celui d'un sol argilo-sableux normal. Dans un tepetate pulvérisé grossièrement, l'humidité atteint le point de flétrissement pendant la saison sèche. Pour une pulvérisation plus fine (agrégats < 2 mm), le sol maintient une réserve utile pour la plante durant toute l'année. En revanche, pour un tepetate naturel à nu, l'humidité demeure en dessous du point de flétrissement une grande partie de l'année.

Au Nicaragua, la réserve en eau est plus importante encore (> 50% du volume du sol). Dans ces conditions, le tepetate se comporte comme un sol limono-argileux (Prat, 1992). La plante peut ainsi continuer de s'alimenter correctement durant la saison sèche. En outre, les observations montrent que l'horizon induré ne ralentit pas la progression du front d'humectation, du moins pour des pluies peu érosives. Pour de fortes pluies, la progression de ce front est tout de même ralentie provoquant une accélération du ruissellement et une érosion des horizons de surface.

### 3.3.3. Evolution des états de surface.

Le ruissellement et l'érosion augmentent en fonction de l'évolution des états de surface. Ceux-ci ont été suivis sur un terrain très fragmenté, à la façon locale, et cultivé en maïs. Les observations ont été réalisées en trois périodes: semis dans le sillon, puis inversion du billon pour le buttage du maïs en deux sarclages successifs. Les résultats sont les suivants (Jérôme, 1992, Janeau et Jérôme, 1992, Quantin, 1992):

- il y a toujours formation d'une croûte, d'abord structurale sur le billon (effet splash de la pluie) puis de dépôt dans le sillon, quand l'infiltration est assez lente pour entraîner une érosion superficielle du billon;

- cette évolution est progressive au cours de la première période du cycle cultural (du semis au premier sarclage). Elle s'accélère par la suite du fait de la réduction de la taille des agrégats et de l'accroissement de l'événement des pluies. La taille des agrégats joue donc un rôle important: ce sont ceux plus petits que 2 mm qui fondent rapidement et déclenchent le processus d'encroûtement. En comparaison, le processus est plus rapide sur le sol labouré et la fonte des agrégats presque totale, entraînant la formation d'une croûte de dépôt plus épaisse et plus intense;

- sur tepetate labouré et non billonné, la croûte se généralise, le ruissellement s'accélère et il se développe une érosion linéaire en griffes. La présence de billons permet de maîtriser complètement le ruissellement et l'érosion, pour le moins dans les conditions climatiques observées en 1990-91. Mais on peut craindre que les billons soient inefficaces pour des pluies plus érosives (> 30 mm/h).

## **4. INTERPRETATION ET DISCUSSION.**

### **4.1. Les sols indurés en conditions naturelles: un environnement fragile et instable.**

Le rôle premier de l'induration et en second lieu de l'environnement naturel (montagnes volcaniques, climat-végétation) font que les sols à horizons indurés constituent un milieu propice à l'érosion hydrique.

#### 4.1.1. le rôle premier de l'induration.

En règle générale, ces horizons indurés n'affleurent qu'après le décapage du sol meuble qui les coiffe. Progressivement, les horizons de surface disparaissent par érosion hydrique et laissent

affleurer de larges plages indurées. Dans tous les cas, l'induration modifie les conditions d'infiltration et de régime hydrique. Il en résulte une faible perméabilité (conductivité hydraulique de l'ordre de 1 mm/h en laboratoire au Mexique et de 5 à 15 mm/h au champ en Equateur) qui bloque la percolation de l'eau. Les coefficients de ruissellement sont donc élevés: ils provoquent une érosion en nappe sur l'horizon induré et une reprise d'érosion sur les sols proches non indurés. En Equateur comme au Mexique, si les pertes en terre sont inférieures à 10 t/ha/an, les coefficients de ruissellement dépassent 70%, voire 80 à 90% lors de fortes pluies.

Le comportement des talpetates du Nicaragua est quelque peu différent. Le talpetate est plus perméable mais aussi plus sensible à l'érosion en ravines et en rigoles.

#### 4.1.2. L'environnement naturel.

L'influence des reliefs volcaniques n'est pas négligeable. La dénivellation relative entre le pied des versants et le sommet des volcans est impressionnante: 1000 m au Nicaragua, de l'ordre de 2000 m au Mexique, près du double en Equateur. En général, les horizons indurés se trouvent en zone de piémont où se concentre et agit efficacement le ruissellement après avoir pris naissance, à l'amont, sur des versants réguliers et pentus (40-70%).

L'incidence du climat intervient aussi, d'une part sur la répartition de la végétation et d'autre part sur l'érosivité des pluies. En Equateur, des simulations de pluies d'intensité faible (20 mm/h durant 30 minutes) ont montré que le régime permanent est atteint en moins de 10 minutes et que le ruissellement dépasse 80%. La circulation de l'eau est d'autant plus efficace que la couverture végétale est discontinue, ce qui est généralement le cas dans les zones à horizons indurés. Ils sont peu à très mal couverts, si ce n'est la présence de plantes xérophytiques dans des zones privilégiées d'atterrissement.

Aux contraintes physiques imposées par l'environnement, s'ajoutent des contraintes chimiques qui s'expriment par une forte carence en azote et phosphore. Ces sols constituent donc en l'état naturel un milieu quasi stérile, impropre à l'agriculture.

### **4.2. Les sols indurés en conditions de réhabilitation: une érosion active et maîtrisable, une exploitation productive et durable.**

Les essais de réhabilitation sont plus avancés au Mexique où on utilise de puissants tracteurs pour ripper et pulvériser les horizons indurés. En Equateur, hormis quelques travaux mécanisés subventionnés par l'Etat, la méthode manuelle au pic est la plus employée. Les études menées dans ces 2 pays sur parcelles de ruissellement montrent qu'en pulvérisant l'horizon induré, on crée de nouvelles conditions d'hydrodynamique et d'érodibilité.

En effet, lorsque ces sols sont travaillés superficiellement, la compétence du ruissellement augmente et les pertes en terre sont importantes. L'érosion augmente en fonction de la diminution de la taille des agrégats (< 2 mm) et l'érosivité des pluies devient le facteur prédominant.

#### 4.2.1. Sur matériau rippé non billonné.

Au Mexique et en Equateur, quelle que soit la profondeur du labour, on constate, par rapport au sol induré originel, une relation étroite entre les valeurs du ruissellement, les pertes en terre élevées et quelques pluies érosives qui provoquent la fonte des agrégats. Sur tepetate et sur cangahua cultivés, le ruissellement varie selon l'érosivité des pluies de 10-20% à 30-40% et les pertes en terre sont importantes, de 70 à 130 t/ha/an.

#### 4.2.2. Sur matériau rippé et billonné.

Le billonnage réduit le ruissellement et freine l'érosion lorsque l'intensité des pluies est faible. Pour des pluies plus érosives, ces valeurs augmentent et atteignent des valeurs trop élevées: 10 à 15% de ruissellement et de 20 à 40 t/ha/an en Equateur et au Mexique. Au Nicaragua, on note les mêmes tendances: au delà de 15% de pente, les billons sont crevés par le ruissellement et l'érosion en griffes est active. Dans ces conditions, le billonnage n'est efficace que combiné avec d'autres méthodes conservatoires, d'autant plus que dans les trois pays le sol est fortement structuré par les pratiques culturales. Au dessous de 2 mm, les agrégats se transforment rapidement en une croûte imperméable.

#### 4.2.3. Sur matériau rippé, billonné et avec ouvrages conservatoires.

Au Nicaragua, la DIRENA a construit (1984-85) dans la zone de haut piémont un système anti-érosif d'absorption, constitué par plusieurs dizaines de kilomètres de talus bordés en amont par un canal, ainsi que des seuils en bois pour régulariser le lit des ravines (Prat, 1989). Les résultats espérés sont décevants et l'érosion progresse car la formule utilisée ("équation de Ramser" in Suarez de Castro, 1982) n'est pas adaptée aux conditions du pays.

C'est pour éviter ce type de problème qu'en Equateur il a été décidé de lutter contre l'érosion en utilisant des ouvrages simples et proches des traditions locales, du type micro-barrages perméables évoluant progressivement en pseudo-terrasses. Des enquêtes socio-agricoles ont permis d'identifier des matériaux autochtones qui pourraient constituer l'architecture de ces ouvrages. C'est ainsi que nous avons été conduits à tester des bandes enherbées de 1 m de large et de petits murets en blocs de cangahua (de 0.4 à 0.6 m de haut initialement), l'ensemble étant disposé de manière isohypse avec un espacement de 10 à 12 m entre ouvrages. Le coût estimé à l'hectare est bas, moins de 100 US\$. Durant les 5 années d'observations, on a constaté une diminution importante de l'érosion: ruissellement compris entre 1.5 et 4%, pertes en terre inférieures à 5 t/ha/an (De Noni *et al.*, 1992).

Ces valeurs faibles permettent d'envisager une mise en valeur des sols rippés que confortent les essais menés au Mexique sur la fertilité. L'équipe mexicaine a montré, en station et au laboratoire, que les carences originelles de ces sols en azote et phosphore pouvaient être corrigées par une fertilisation adaptée à la plante, soit minérale (N 60 à 120 et P 60) soit organique (fumure). Ces essais ont permis d'obtenir des rendements satisfaisants: presque normaux dès la première année pour le blé, l'orge, le haricot et la vesce; plus tardifs, à partir de la 2<sup>ème</sup> voire la 3<sup>ème</sup> année pour le maïs ou la fève (Quantín, 1992, Marquez *et al.*, 1992, Baez *et al.*, 1994, Chora *et al.*, 1994).

Les études menées en Equateur, au Mexique et au Nicaragua sont très complémentaires et permettent d'énoncer, grâce à une meilleure connaissance du comportement hydrodynamique et de l'érodibilité des sols indurés, quelques principes relatifs à une gestion mieux adaptée et plus durable des paysages volcaniques. Il ressort de cette analyse comparative que:

- les sols indurés sont très sensibles au ruissellement en conditions naturelles. Avant d'entreprendre des projets de réhabilitation, il est nécessaire d'abord de contrôler la circulation de l'eau qui met en danger la stabilité des zones bordières;
- il est possible, après rippage, de corriger par des amendements adaptés les carences chimiques. Il est ainsi envisageable d'obtenir des rendements corrects;
- pour que la productivité soit durable, il est nécessaire d'installer sur les parcelles des ouvrages conservatoires car l'horizon rippé devient très érodible;
- le coût global des opérations est cependant très élevé pour de petits propriétaires qui sont les plus concernés. Le rôle de l'Etat semble nécessaire pour pouvoir concrétiser à l'échelle régionale des projets de ce type.

# Littérature citée

Asseline, J. et Valentin C. 1976. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion, Cah. ORSTOM, série Hydrol., 15 (4), Paris, 321-349.

Baez, A., Prat, C., Marquez Ramos, A. et Chora, A., 1994 - Premiers résultats d'essais agronomiques visant à la réhabilitation agricole du tepetate t3 (Texcoco, Mexique) : 1. Cas de l'orge et de la vesce. Dans ce volume.

Casenave, A. et Valentin, C. 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Paris, 240 p.

Caujolle-Gazet, A. et Luzuriaga, C. 1986. Estudio de un tipo de cangahua en el Ecuador. Posibilidades de mejoramiento mediante el cultivo. Documentos de investigacion (6), Quito, 59-67.

Chora, A., Márquez Ramos, A., Prat, C. et Baez, A., 1994. Premiers résultats d'essais agronomiques visant à la réhabilitation agricole du tepetate t3 (Texcoco, Mexique) : II. Essais agronomiques. Dans ce volume résumé.

Couchat, P. 1974. Mesure neutronique de l'humidité des sols. Thèse Univ. P. Sabatier, Toulouse.

Custode, E., De Noni, G., Trujillo, G., Viennot, M. 1992. La cangahua en el Ecuador: caracterización morfo-edafológica y comportamiento frente a la erosión. Actes du Symposium international sur les sols volcaniques indurés, Terra vol.10, Mexico, 332-346.

De Noni, G., Derruau, M. 1979. Sur la géomorphologie des pyroclastites dans les Andes de l'Equateur, Cah. ORSTOM, série Sci. Hum. 16 (3). 251-259.

De Noni, G., Nouvelot, J.F. 1983. Los principales procesos erosivos en Ecuador, Actes du Séminaire PRONACCS-UNESCO, Quito, 11 p.

De Noni, G., Nouvelot, J.F., Trujillo, G. 1984. Erosion and conservation of volcanic ash soils in the highlands of Ecuador: a case study. 6 th International soil classification workshop, part.1. Chile and Ecuador. SMSS, (Washington), PUCC (Santiago de Chile). 263-274.

De Noni, G., Trujillo, G., Viennot, M. 1986. L'érosion et la conservation des sols en Equateur, Cah. ORSTOM, série Pédologie 22 (2). 235-245.

De Noni, G., Trujillo, G., Viennot, M. 1990. Mesures de l'érosion dans les Andes de l'Equateur, Cah. ORSTOM, série Pédologie 25 (1-2). 183-197.

De Noni, G., Trujillo, G., Viennot, M. 1992. Analisis historico, social y economico de la cangahua en el Ecuador. Actes du Symposium international sur les sols volcaniques indurés, Terra vol.10, Mexico, 385-391.

Etchevers, J., Zebrowski C., Hidalgo, C., Quantin, P. 1992 a. Fertilidad de los tepetates. Situación del fósforo y del potasio en tepetates de Mexico y Tlaxcala. Actes du Symposium international sur les sols volcaniques indurés, Terra vol.10, Mexico, 385-391.

Etchevers, J., Cruz, L., Mares, J., Zebrowski C. 1992 b. Fertilidad de los tepetates. II Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Actes du Symposium international sur les sols volcaniques indurés, Terra vol.10, Mexico, 379-384.

Janeau  
du Sy

Jerôme  
volcan  
sol no

Marqu  
Actes  
473.

Marqu  
l'érosi  
résumé

Miehl  
Vulkan  
Habiti

Nimlo  
Soil sc

Peña, I  
la Sierr

Pourru

Poss, I  
Conséc

Prat C.  
de Mar

Prat, C  
Nicara  
rôle da

Prat, C  
volcani  
sols vo

Prat, C.  
Masaya  
355-36

Prat, C  
palagor  
degrada  
du sol,

Prat C.  
program  
México

Janeau J. L., Jérôme, G. 1992. Evolución estructural de la superficie de suelos con tepetate. Actes du Symposium international sur les sols volcaniques indurés, Terra vol.10, Mexico, 374-378.

Jérôme, G. 1992. Etude des réorganisations superficielles sous pluies naturelles sur un sol volcanique induré, le tepetate dans la vallée du fleuve Texcoco au Mexique. Comparaison avec un sol non induré. Mémoire de fin d'étude. ISTOM-Cergy Pontoise, 119 p.

Marquez, M., Zebrowski, C., Navarro, H. 1992. Alternativas para la recuperación de tepetates. Actes du Symposium international sur les sols volcaniques indurés, Terra vol.10, Mexico, 465-473.

Marquez A., Prat, C., Huerta, E., Carrillo E. et Janeau, J.L., 1994. Premiers résultats du suivi de l'érosion hydrique et de l'hydrodynamique des sols à tepetates (Texcoco, Mexique). Dans ce volume résumé.

Miehlich, G. 1984. Chronosequenzen und anthropogene Veränderungen andesitischer Vulkanascheböden in drei Klimastufen eines randtropischen Gebirges (Sierra Nevada de Mexico). Habilitation thesis. Hamburg. 417 p.

Nimlos, T. 1990. The strength moisture relations and hydraulic conductivity of mexican tepetate. Soil science, vol. 150 (1). 425-430.

Peña, D. et Zebrowski, C. 1992. Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Contrat CEE-ORSTOM, TS2 - 0212.

Pourrut, P. et al. 1994 (à paraître). L'homme et l'eau, Ed. ORSTOM.

Poss, R. 1991. Transferts de l'eau et des éléments minéraux dans les terres de barre du Togo. Conséquences agronomiques. Thèse de Doctorat, Univ. Paris VI, 335 p.

Prat C. 1989. Relations entre érosion et systèmes de production dans le bassin-versant sud du lac de Managua (Nicaragua), Cah. ORSTOM, série Pédol., 1-2 (25), 171-182.

Prat, C. 1991. Etude du talpetate, horizon volcanique induré de la région Centre-Pacifique du Nicaragua. Genèse, caractérisation morphologique, physico-chimique et hydro-dynamique, son rôle dans l'érosion des sols. Thèse de Doctorat, Université de Paris VI, Paris, 350 p.

Prat, C. et Quantin, P. 1992. Origen y genesis del talpetate, horizonte endurecido de suelos volcanicos de la region Centro-Pacífico de Nicaragua, Actes du Symposium international sur les sols volcaniques indurés, Terra vol.10, Mexico, 267-282.

Prat, C., Blandon, E., Martinez J.M., Herrera, M. 1992. Agua y talpetate - Toba palagonitizada de Masaya, Acte du Symposium international sur les sols volcaniques indurés, Terra vol.10, Mexico, 355-369.

Prat, C. y Quantin, P. 1993. El talpetate de la region Centro-Pacífico de Nicaragua: una toba palagonitizada del volcan de Masaya. In: J. F. Gallardo Llancho (Eds). El estudio del suelo y de su degradación en relación con la desertificación. Actes du XII Congrès Latino-américain de la science du sol, Salamanca, Espagne, Vol. III, p 1372-1381.

Prat C., Oropeza J.L. y Janeau J.L. 1993. Resultados del primer año de investigación del programa ORSTOM-CP sobre la rehabilitación de los tepetates (suelos volcánicos endurecidos) de México. In: J. F. Gallardo Llancho (Eds). El estudio del suelo y de su degradación en relación con



la desertificación. Actes du XII Congrès Latino-américain de la science du sol. Salamanca, Espagne, Vol. III, p 1367-1371.

Quantin, P. 1992. Etude des sols volcaniques indurés "Tepetates" des bassins de Mexico et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole. Rapport scientifique final Contrat ORSTOM-CEE. TS2 A212 C Bruxelles. 77 p.

Suarez de Castro, F., 1982. Conservación de suelos, Ed. IICA, San José, Costa Rica, 315 p.

Werner, G. 1992. Suelos endurecidos (Tepetates) en el estado de Tlaxcala: distribución, rehabilitación, manejo y conservación, Actes du Symposium international sur les sols volcaniques indurés, Terra vol.10, Mexico, 318-331.

Wischmeier, W.H. et Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA, Agr. Handbook, 537.

Zebrowski, C. 1992. Los suelos volcanicos endurecidos en America latina. Actes du Symposium international sur les sols volcaniques indurés, Terra vol.10, Mexico, 15-23.



ACAPULCO, MEXICO  
JULY 10-16, 1994

042



VOLUME 6a:  
COMMISSION V: SYMPOSIA

Transactions

15<sup>th</sup> World Congress of Soil Science  
15 Bodenkundlicher Weltkongress  
15<sup>ème</sup> Congrès Mondial de la Science du Sol  
15° Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo

p. 554-570

*Published in 1994 by*  
**THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SOIL SCIENCE**  
*and*  
**THE MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE**

*Copyright 1994*  
*International Society of Soil Science*  
*and*  
*Mexican Society of Soil Science*

**MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE**  
ISBN 968-6201-15-7 (all transactions volumes)  
ISBN 968-6201-27-0 (this volume)

**INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA  
GEOGRAFIA E INFORMATICA**  
ISBN 970-13-0143-9 (all transactions volumes)  
ISBN 970-13-0154-4 (this volume)

*Printed by courtesy of INEGI and CNA (Mexico)*  
*July 1994*

Symposium ID-13

Thursday, July 14  
afternoon session

## Indurated Volcanic Soils, Uses and Management

Convener: Paul Quantin. (*France*)  
Co-conveners: Christian Prat. (*Mexico*)  
Héctor M. Arias R. (*Mexico*)

### Foreword

	Page
Introduction à la Connaissance et à la Mise en Valeur des Sols Volcaniques à Horizons Indurés.	430
Introduction to the Knowledge and Management of Indurated Volcanic Soils Horizons. P. Quantin.....	436

### Characterisation, Genesis and Classification of Indurated Volcanic Soils Horizons.

#### 1. Processes of Cementation.

Indurations Siliceuses dans les Sols Volcaniques ; Comparaison avec des Silcrètes Anciens. D. Dubroencq et M. Thiry.....	445
Calcitic Accretion on Indurated Volcanic Materials (Examples of Tepetates, Altiplano, Mexico). N. Fedoroff, M. A. Courty, E. Lacroix and K. Oleschko.....	460
Formation of Petrocalcic Horizons in Soils from Basic Pyroclastics under the Semiarid Climate of Lanzarote (Spain). R. Jahn and K. Stahr.....	474

#### 2. Criteria and Classification

Criteria and Classification of Indurated Volcanic Soils Horizons. K. W. Flach, T. J. Nimlos and R. J. Engel.....	481
--	-----

#### 3. Characterization, Regional Typology.

Indurated Volcanic Ash Soils in Japan, their Characterization, Land Use and Management. Y. Yamada, H. Kubotera and S. Shoji .....	487
The Talpetate of the Center-Pacific Region of Nicaragua: a Palagonitized Tuff from the Masaya Volcano. C. Prat and P. Quantin.....	497
Characterization and Agricultural Assessment of Two Talpetates Profiles in Nicaragua. A. W. Vogel, D. Creutzberg and J. H. Kaufman.....	507
Indurated Horizons in Poorly Drained Volcanic Soils from Chile. W. Luzio and T. Palma .....	516

#### 4. Anthropic Impact on the Indurated Horizons and Soil Erosion.

The Tepetates of the Mexican Central Highlands : Prehispanic and Modern Impact of Agriculture and Water Management. M. Aliphat Fernández and G. Werner.....	528
---	-----

### Reclamation of Indurated Volcanic Soils : Erosion and Conservation, Fertility, to a Sustainable Agriculture and Forest Management.

#### 1. Introduction

A Tepetate Reclamation Program in the Mexico Watershed. H. Arias Rojo and J. L. Oropeza.....	541
--	-----

July 14  
session

Page  
430  
min..... 436

nciens.  
..... 445  
lexico).  
..... 460  
nate of  
..... 474

nd R. J.  
..... 481

madada,  
..... 487

lasaya  
..... 497

gel, D.  
..... 507  
..... 516

re and  
..... 528

re and  
..... 541

2. Hydrodynamics, Erosion and Conservation.

Hydrodynamique, Érodibilité et Conservation des Sols Volcaniques Indurés d'Amérique Latine  
(Équateur, Mexique et Nicaragua): Impact du Matériau Originel et Effet de la Réhabilitation  
Agricole. G. de Noni, J. L. Janeau, C. Prat, G. Trujillo et M. Viennot..... 554

3. Present and Potential Fertility.

Fertilidad de los Suelos Volcánicos Endurecidos: Características Químicas y Microbiológicas de los  
Tepetates en México. J. D. Etchevers B. y R. Ferrera Cerrato..... 571

4. The agricultural Rehabilitation

La Réhabilitation Agricole des Sols Volcaniques Indurés et Érodés en Équateur et au Mexique.  
H. Navarro et C. Zebrowski..... 592